

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengantar

1.1.1 Latar Belakang

Perubahan iklim menjadi perhatian seluruh dunia termasuk Indonesia. Isu lingkungan tersebut belum lama ini kembali dibahas dalam konferensi tingkat internasional COP (*Conferences of the Parties*) ke-21 di Kota Paris, Prancis akhir tahun 2015 lalu diselenggarakan oleh UNFCCC (*United Nation Framework Convention on Climate Change*). Tujuannya ialah menghasilkan suatu kesepakatan internasional yang baru terkait perubahan iklim, bersifat mengikat dan berlaku untuk semua negara, untuk menjaga pemanasan global dibawah 2°C (COP21, 2015).

Perubahan iklim ditandai dengan fenomena pemanasan global. Seperti yang kita ketahui pemanasan global disebabkan oleh peningkatan kandungan gas-gas rumah kaca (GRK) di atmosfer khususnya semakin banyaknya zat asam arang (CO₂) oleh aktivitas manusia. Enam jenis GRK utama berdasarkan Protokol Kyoto yang menjadi konsentrasi dalam pengendalian emisi GRK yaitu karbon dioksida (CO₂) yang paling sering menjadi kajian dalam studi perubahan iklim, metana (CH₄), dinitro oksida (N₂O), *hidroflourocarbons* (HFCs), *perfluorocarbons* (PFCs), dan *sulfurhexafluoride* (SF₆) (Rao dan Riahi, 2006). GRK di atmosfer berfungsi untuk menjaga suhu permukaan bumi agar tetap hangat, tetapi ketika komposinya tidak seimbang, terjadi peningkatan kandungan CO₂, radiasi sinar matahari yang sebagian seharusnya dipantulkan kembali ke luar angkasa cenderung terperangkap di bawah atmosfer oleh GRK dan dipantulkan kembali ke bumi, sehingga menyebabkan peningkatan suhu permukaan bumi, hal ini dikenal sebagai efek rumah kaca (TimARuPA, 2014). Apabila emisi GRK tidak dikurangi antarlain dapat menyebabkan peningkatan risiko terjadinya cuaca ekstrim seperti badai besar, banjir dan kekeringan, diikuti dengan peningkatan muka air laut, kekurangan air dan makanan, dampak ireversibel pada masyarakat dan ekosistem yang rentan (WWF, 2015).

Tanpa adanya usaha atau mitigasi tambahan untuk mengurangi emisi GRK, skenario terburuk berdasarkan *Assesment Report* ke-5 dari IPCC (*Intergoverenmental Panel on Climate Change*) memperkirakan bahwa pada tahun 2100 temperatur rata-rata global pada permukaan bumi akan meningkat antara 2,5°C – 7,8 °C (IPCC, 2014). Tentunya hal ini menjadi sesuatu yang sangat memprihatinkan apabila pemanasan global berlangsung secara terus menerus.

Mempertahankan cadangan karbon yang ada untuk menurunkan emisi karbon merupakan salah satu cara yang dapat dilakukan saat ini untuk mengurangi dampak merugikan dari adanya perubahan iklim (mitigasi) (TimARuPA, 2014; Saputra, 2013). Hal ini terjadi melalui salah satu interaksi alamiah terpenting antara atmosfer dengan biosfer berupa transfer kandungan karbon. Karbon diserap oleh biosfer melalui fotosintesis, dan dilepaskan (emisi) ke atmosfer melalui proses autotropis dan respirasi heterotropis (Malhi, dkk., 1998). Deforestasi diperkirakan menyumbang 20% emisi GRK sehingga menjadi penyebab terbesar kedua perubahan iklim setelah emisi dari penggunaan bahan bakar fosil. Konversi hutan menjadi peruntukan lain memicu terjadinya pelepasan karbon pada biomassa tumbuhan dalam jumlah besar ke atmosfer, termasuk perubahan vegetasi penutup lahan juga menyebabkan tidak terjadinya proses penyerapan karbon sehingga yang terjadi bukan hanya pelepasan cadangan karbon namun juga hilangnya fungsi penyerapan karbon (FWI, 2009). Oleh karena itu, mempertahankan tutupan lahan hutan secara langsung dapat mempertahankan cadangan karbon dan mengurangi kandungan CO₂ di atmosfer.

Berdasarkan data statistik kementrian kehutanan 2013 angka laju deforestasi hutan di Indonesia periode 2011-2012 mencapai 613.480,7 Ha/tahun (Kemenhut, 2014). Dilansir dari berita *National Geographic Indonesia*, Indonesia merupakan negara yang memproduksi gas emisi rumah kaca ketiga terbesar di dunia, setelah Tiongkok dan Amerika Serikat dengan 85% emisi berasal dari degradasi dan deforestasi hutan.

Hutan memiliki peran penting dalam penyimpanan dan penyerapan karbon, 32 milyar ton CO₂ yang dihasilkan oleh aktivitas manusia per tahunnya kurang dari 5 milyar ton diserap oleh hutan (CIFOR, 2010), tetapi kemampuan hutan dalam

menyerap dan menyimpan karbon tidak sama baik di hutan alam, hutan tanaman, hutan payau, hutan rawa maupun di hutan rakyat tergantung pada jenis pohon, tipe tanah, dan topografi (Masripatin, dkk., 2010). Karbon yang diserap oleh tanaman disimpan dalam bentuk biomassa kayu, sehingga cara yang paling mudah untuk meningkatkan cadangan karbon adalah dengan menanam dan memelihara pohon (Lasco, dkk., 2004 dalam Rahayu, dkk., 2006).

Kota Surakarta merupakan salah satu daerah perkotaan di Indonesia yang mengalami pertumbuhan pesat dalam hal pembangunan dan keberadaan berbagai fasilitas perkotaan. Tuntutan perkembangan daerah perkotaan tersebut menuju perkotaan modern memicu terjadinya konversi lahan hijau menjadi lahan terbangun. Selain itu, tingginya aktivitas penduduk perkotaan memicu terjadinya mobilitas yang tinggi dalam hal ini transportasi dari dan keluar kota dengan kendaraan bermotor. Hal tersebut menyebabkan berkurangnya kemampuan penyerapan sekaligus penyimpanan karbon sebagai akibat dari berkurangnya ruang terbuka hijau. Padahal kandungan karbon di atmosfer semakin banyak yang juga dapat berasal dari emisi karbon kendaraan bermotor maupun penebangan vegetasi di lahan hijau itu sendiri sehingga dapat berpengaruh pada perubahan iklim.

Kabupaten Sukoharjo yang terletak di sisi Selatan Kota Surakarta mendapat pengaruh yang besar terhadap perkembangan kota tersebut, termasuk pengurangan lahan hijau dan bertambahnya emisi karbon dari kegiatan transportasi ditambah lagi dengan terdapatnya berbagai pabrik industri yang berada di Kabupaten Sukoharjo termasuk perkembangan pesat Kecamatan Sukoharjo dan Kecamatan Kartasura. Salah satu ruang terbuka hijau yang memiliki potensi besar dalam menyimpan cadangan karbon ialah hutan rakyat. Menurut BPKH (Balai Pemantapan Kawasan Hutan Wilayah) XI Jawa-Madura, taksiran potensi karbon tegakan kayu hutan rakyat di pulau Jawa-Madura mencapai 40 juta ton (Suprpto, 2010).

Pemanasan global sebagai pertanda terjadinya perubahan iklim telah dirasakan saat ini terutama pada iklim lokal area perkotaan. Suhu perkotaan menjadi semakin panas termasuk di Kota Surakarta. Saat ini kondisi suhu udara maksimum Kota Surakarta naik 5 °C atau sudah mencapai 36 °C dalam kurun waktu 4 tahun terakhir (2011-2015). Tercatat bahwa rata-rata suhu di Kota Surakarta pada

musim kemarau tahun 2011 mencapai 30,5 °C, pada periode yang sama tahun 2013 naik menjadi 33 °C, dan tahun 2015 mencapai 35 °C yang sudah termasuk kategori ekstrem (Afifah, 2015). Adapun upaya mengurangi emisi GRK dan ketersediaan ruang terbuka hijau di Kota Surakarta belum maksimal dan harus didukung oleh seluruh masyarakat dan Pemerintah. Hal ini menunjukkan bahwa daerah sekitarnya turut berperan dan dipengaruhi kondisi iklim lokalnya, termasuk di Kabupaten Sukoharjo, sehingga peran hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo sebagai penyeimbang emisi GRK dan suhu udara perlu untuk diperhatikan.

Hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo termasuk hutan rakyat yang perlu diinventarisasi jumlah potensi cadangan karbonnya. Berdasarkan data Dinas Kehutanan Provinsi Jawa Tengah, pada tahun 2104 di Kabupaten Sukoharjo tercatat 17,11% (7984 Ha) luas wilayahnya merupakan kawasan hutan rakyat sedangkan hutan negara hanya 0,80 % (374,45 Ha) (BPS, 2014). Data tersebut menunjukkan bahwa hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo memiliki peran besar dalam penyerapan dan penyimpanan karbon di banding hutan negara.

Tabel 1.1 Luas Hutan Rakyat Kabupaten Sukoharjo Tahun 2010-2014

| Tahun | Luas (Ha) |
|-------|-----------|
| 2010 | 16192 |
| 2011 | 17982 |
| 2012 | 17932 |
| 2013 | 7984 |
| 2014 | 7984 |

Sumber: Neraca Suber Daya Hutan Provinsi Jawa Tengah Tahun 2014

Tabel 1.1 di atas menunjukkan bahwa luas hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo dari tahun 2010 sampai 2014 mengalami penurunan yang cukup signifikan. Berkurangnya luas hutan rakyat tersebut mengindikasikan telah terjadi penurunan cadangan karbon yang tersimpan di Kabupaten Sukoharjo sekaligus menyumbang emisi GRK. Pada tanggal 24 Agustus 2015, dilansir dari merdeka.com hutan jati milik rakyat seluas 2 Ha di Desa Ngasih dan Desa Tiyan, Kecamatan Bulu, Sukoharjo hangus terbakar (Sunaryo, 2015). Kejadian ini juga menunjukkan bahwa hutan rakyat memiliki pengaruh terhadap emisi GRK,

hutan terbakar melepas kandungan cadangan karbon ke atmosfer, akibat dari pengelolaan hutan yang kurang baik oleh masyarakat. Tetapi baik jumlah cadangan karbon yang masih tersisa maupun yang diemisikan tidak dapat diketahui karena belum terdapat data inventarisasi secara kuantitatif dan spasial mengenai hal tersebut.

Keberadaan hutan rakyat tentunya juga memiliki peran penting dalam mitigasi perubahan iklim. Hal ini sekaligus menunjukkan peran nyata masyarakat khususnya para petani hutan rakyat dalam mitigasi perubahan iklim. Tetapi kebanyakan masyarakat belum menyadari akan pentingnya hutan rakyat tersebut dalam konteks mitigasi perubahan iklim (Tim ARuPA, 2014). Para petani pun bahkan pemerintah daerah belum mengetahui berapa banyak cadangan karbon yang tersimpan dalam hutan rakyat tersebut. Padahal salah satu dari kesepakatan COP 21 ialah sistem penghitungan karbon dan pengurangan emisi harus dilakukan secara transparan (Firmansyah, 2015). Hal ini juga menunjukkan pentingnya kedudukan perhitungan cadangan karbon di hutan rakyat dan penyajian agihannya secara spasial sebagai implementasi kesepakatan COP 21.

Pohon di hutan rakyat merupakan komponen penting yang mampu mengurangi dampak perubahan iklim. Dengan demikian perhitungan cadangan karbon di hutan rakyat dianggap sangat penting untuk dilakukan agar dapat diperkirakan kemampuan menyimpan karbon di dalam hutan termasuk nantinya dapat dimanfaatkan untuk mengetahui kemampuan penyerapan emisi karbon. Masyarakat kemudian juga akan paham arti pentingnya hutan rakyat terhadap perubahan iklim tidak hanya dipandang sebagai nilai ekonomis saja, kayu dari hutan rakyat banyak digunakan untuk produksi mebel, tetapi juga mementingkan fungsi ekologisnya.

Cadangan karbon hutan di suatu wilayah dikonversi berdasarkan nilai biomassa. Kandungan cadangan karbon tersebut dapat diperoleh secara konvensional melalui pengukuran biomassa lapangan (metode terestris), metode ini memiliki akurasi yang tinggi tetapi memerlukan banyak waktu, tenaga, dan biaya yang cukup tinggi untuk wilayah yang luas. Teknologi penginderaan jauh dapat mengatasi keterbatasan tersebut, mengingat kemajuan teknologi penginderaan jauh

yang berkembang pesat. Terutama data citra satelit penginderaan jauh baik sistem optik maupun sistem non-optik. Pemanfaatannya termasuk pada bidang ekologi hutan, yang mana terdapat berbagai penelitian yang memanfaatkan teknologi ini untuk menduga cadangan karbon hutan.

Salah satu data satelit penginderaan jauh sistem aktif ialah data SAR (*Synthetic Aperture Radar*) Sentinel-1 milik ESA (*European Space Agency*) yang mana salah satu pemanfaatannya dalam bidang monitoring lahan kehutanan, ialah mengestimasi biomassa sehingga memiliki peran dalam pemetaan cadangan karbon (SUHET, 2013). Sensor yang dibawa Sentinel-1 bersifat aktif dengan gelombang mikro sehingga memiliki keunggulan dibanding sistem optik yaitu dapat menembus awan dan tidak terganggu oleh cuaca serta dapat mengindera baik siang maupun malam (CCRS, 2014). Dengan demikian pemanfaatan data ini penting untuk dikembangkan di Indonesia, khususnya untuk pendugaan cadangan karbon, mengingat Indonesia yang terletak dekat dengan ekuator sehingga data-data penginderaan jauh optis yang tersedia sering terganggu oleh pengaruh atmosfer dan tutupan awan.

Berdasarkan pernyataan-pernyataan yang telah diuraikan di atas dan melihat potensi data penginderaan jauh khususnya sistem aktif radar dan sistem informasi geografi dalam menyajikan data spasial. Maka penulis mengambil penelitian dengan judul: Pendugaan Cadangan Karbon di Atas Permukaan Pada Hutan Rakyat Dengan Memanfaatkan Data *Synthetic Aperture Radar* Sentinel-1 (Studi Kasus di Kabupaten Sukoharjo). Selain itu, pemanfaatan data SAR khususnya data Sentinel-1 untuk pendugaan cadangan karbon masih jarang dilakukan, dibanding dengan pemanfaatan data penginderaan jauh optik, sehingga menjadi sangat menarik untuk diteliti. Penelitian ini diharapkan bisa menjadi kajian yang baik terhadap bagaimana pemanfaatan data SAR Sentinel-1 untuk pendugaan cadangan karbon di atas permukaan.

1.1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas dapat maka rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana keeratan hubungan nilai hamburan balik data SAR (*Synthetic Aperture Radar*) Sentinel-1 dua polarisasi dengan cadangan karbon hutan rakyat berdasarkan nilai biomassa hijau di atas permukaan?;
2. Bagaimana menduga cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo dengan memanfaatkan data dual polarisasi SAR Sentinel-1?;
3. Bagaimana jumlah dan agihan cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo berdasarkan data SAR Sentinel-1?

1.1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan:

1. Menganalisis hubungan antara nilai hamburan balik data SAR Sentinel-1 dual polarisasi dengan nilai cadangan karbon hutan rakyat berdasarkan nilai biomassa hijau di atas permukaan;
2. Menduga cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo dengan memanfaatkan data dual polarisasi SAR Sentinel-1;
3. Menentukan jumlah dan agihan cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo berdasarkan data SAR Sentinel-1.

1.1.4 Kegunaan Penelitian

Adapun kegunaan yang diharapkan dari penelitian ini dalam bidang keilmuan dan kegunaan praktis antarlain:

1. Memberikan pengetahuan dan pemahaman perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam bidang penginderaan jauh aktif gelombang mikro (sistem radar) khususnya data SAR Sentinel-1 terkait pemanfaatannya untuk estimasi cadangan karbon;
2. Mengasah kemampuan untuk mengestimasi cadangan karbon hutan melalui penguasaan teknologi pengolahan data SAR Sentinel-1;

3. Menyediakan informasi spasial terkait jumlah dan agihan cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di area studi; dan
4. Sebagai bahan masukan bagi pemerintah dan masyarakat setempat dalam pengelolaan hutan rakyat untuk inventarisasi cadangan karbon hutan.

1.2 Telaah Pustaka dan Penelitian Sebelumnya

1.2.1 Telaah Pustaka

1.2.1.1 Perubahan Iklim dan Emisi Karbon

Perubahan iklim yang terjadi telah banyak dibuktikan secara ilmiah melalui berbagai penelitian dan merupakan isu internasional. Perubahan iklim ditandai dengan terjadinya pemanasan global yang menimbulkan berbagai dampak pada aspek kehidupan manusia. Perubahan iklim berarti terjadinya perubahan iklim di bumi khususnya perubahan suhu udara dan curah hujan yang terjadi secara berangsur-angsur dalam jangka panjang (Tim ARuPA, 2014). Seperti yang dapat dirasakan saat ini bahwa musim kemarau semakin panjang dan musim penghujan semakin singkat namun dengan intensitas curah hujan yang tinggi. Lugina, dkk (2011) menyatakan dampak lain berupa kekeringan yang berkepanjangan, gagal panen, krisis pangan, air bersih, pemanasan muka laut serta banjir dan longsor. Hal tersebut menunjukkan bahwa pemanasan global dapat mengancam kehidupan manusia di bumi.

Perubahan iklim terjadi karena meningkatnya kandungan gas rumah kaca (GRK) di atmosfer terutama karbon dioksida (CO_2) yang banyak dihasilkan oleh berbagai aktivitas manusia dan yang paling sering menjadi kajian dalam studi perubahan iklim, metana (CH_4), dinitro oksida (N_2O), *hidrofluorocarbons* (HFCs), *perfluorocarbons* (PFCs), dan *sulfurhexafluoride* (SF_6) (Rao dan Riahi, 2006). Semakin tingginya konsentrasi GRK tersebut terutama CO_2 menyebabkan efek rumah kaca ketika GRK sudah tidak mampu menjaga suhu bumi agar tetap hangat, melainkan terlampaui panas karena radiasi matahari yang sebagian seharusnya dipantulkan kembali ke luar angkasa cenderung terperangkap di atmosfer. Peristiwa meningkatnya suhu rata-rata di atmosfer, laut dan bumi disebut sebagai pemanasan global (Tim ARuPA, 2014).

Aktivitas manusia baik secara langsung maupun tidak langsung menyebabkan tingginya pelepasan (emisi) karbon GRK di atmosfer. Menurut Lugina, dkk (2011) peningkatan emisi dapat diakibatkan oleh proses pembangunan dan industri berbahan bakar migas (BBM) yang semakin meningkat dan kegiatan penggunaan lahan serta alih guna lahan dan kehutanan (LULUCF = *Land Use, Land Use Change and Forestry* yang sekarang disebut sebagai AFOLU = Agriculture, Forestry and Land Use). Penggunaan lahan *Forestry* yang dimaksud disini ialah termasuk hutan rakyat. Penelitian yang dilakukan oleh IPCC (2014) pada tingkat dunia menyebutkan bahwa pada tahun 2010 AFOLU sebesar 24% mengemisikan CO₂ di atmosfer secara langsung. IPCC juga menyebutkan bahwa selama 1990-2005 telah terjadi peningkatan suhu merata di seluruh bumi antara 0,15° sampai 3 °C.

Dalam konteks perubahan iklim, hutan dapat berperan baik sebagai *sink* (penyerap/penyimpan karbon) maupun *source* (pengemisi karbon). Deforestasi dan degradasi meningkatkan *source*, sedangkan kegiatan pertanaman serta konservasi hutan meningkatkan *sink* (Lugina, dkk, 2011). Oleh karena itu, hutan rakyat dapat menjadi *sink* yang tidak kalah baik dengan hutan alamiah dan harus dijaga agar tidak menjadi *source* terbesar.

Membangun, mengontrol, dan menjaga hutan rakyat merupakan salah satu contoh upaya dalam mitigasi perubahan iklim karena dapat menyimpan karbon lebih lama dan mengurangi emisi karbon oleh deforestasi. Adapun mitigasi perubahan iklim menurut Tim ARuPA (2014) merupakan upaya mengurangi efek merugikan yang timbul dari adanya perubahan iklim melalui pengurangan emisi gas rumah kaca. Keterkaitan ini terjadi karena adanya keseimbangan konsentrasi GRK di atmosfer yang dikontrol oleh siklus karbon.

1.2.1.2 Biomassa dan Cadangan Karbon Hutan

Potensi cadangan karbon dapat diturunkan berdasarkan nilai biomassa pohon. Menurut Brown (1997) biomassa merupakan jumlah total bahan organik hidup di atas tanah pada pohon (ranting, cabang, batang utama, dan kulit) yang dinyatakan dalam berat kering ton per unit area. Kandungan biomassa pada hutan

dapat berubah seiring berjalannya waktu, bertambah secara alami maupun berkurang karena pengaruh dari kerusakan hutan oleh aktivitas manusia.

Kandungan biomassa memiliki hubungan yang erat terkait kandungan karbon yang tersimpan di hutan karena pepohonan mampu menyerap karbon dioksida (CO_2) untuk fotosintesis dan disimpan dalam bentuk karbohidrat pada kantong karbon di akar, batang, dan daun sebelum dilepaskan kembali ke atmosfer (FWI, 2009). Oleh karena itu, untuk menduga cadangan karbon di suatu hutan rakyat harus mengetahui nilai biomasanya. Biomassa merepresentasikan jumlah potensi cadangan karbon karena 50% vegetasi hutan tersusun atas karbon (Brown, 1997). Mengukur jumlah yang disimpan dalam tubuh tanaman hidup (biomasa) pada suatu lahan dapat menggambarkan banyaknya CO_2 di atmosfer yang diserap oleh tanaman (Hairiah, dkk., 2011). Dengan demikian kemampuan penyerapan karbon oleh tanaman juga ditunjukkan oleh besarnya nilai biomasanya yang berarti cadangan karbon juga merepresentasikan banyaknya hasil penyerapan karbon yang kemudian disimpan oleh tanaman tersebut.

Pengukuran biomassa tanam tersebut menurut Hairiah, dkk. (2011) dapat dilakukan dengan dua cara ialah *non-destructive* dan *destructive*. Metode *non-destructive* (tanpa melakukan kerusakan) ketika jenis tanaman yang diukur sudah memiliki rumus allometrik. Sedangkan metode *destructive* dilakukan dengan tujuan untuk mengembangkan rumus allometrik melalui menebang pohon dan mengukur diameter, panjang dan berat masanya.

Terdapat dua macam biomassa yaitu biomassa di atas permukaan (*Above Ground Biomass/AGB*) dan di bawah permukaan tanah (*Bellow Ground Biomass/BGB*). AGB terdiri dari pepohonan dan tumbuhan yang tumbuh di atas tanah (batang, cabang, kulit kayu dan daun) sedangkan BGB mencakup akar-akar kasar dan halus. Sebenarnya terdapat kelompok bahan organik mati berupa seresah dan kayu, serta kandungan organik tanah yang juga berkontribusi terhadap biomassa total. Ketiganya masing-masing merepresentasikan kelompok sumber karbon (FWI, 2009; Krisnawati, dkk., 2015). Penelitian ini fokus pada estimasi cadangan karbon berdasarkan nilai AGB.

Cadangan karbon pada berbagai lahan hutan berbeda-beda. Menurut Hairiah (2011) terdapat beberapa faktor yang memengaruhi jumlah cadangan karbon di suatu lahan yaitu keanekaragaman dan kepadatan tumbuhan yang ada, jenis tanahnya serta cara pengelolaannya. Semakin baik kondisi kesuburan tanahnya maka penyimpanan karbon pada suatu lahan menjadi lebih besar, karena biomassa pohon meningkat.

1.2.1.3 Hutan Rakyat Sebagai Cadangan Karbon

Hutan rakyat merupakan hutan tanaman yang sengaja ditanam oleh rakyat pada tanah hak miliknya baik secara perorangan maupun berkelompok. Hutan memiliki peran penting dalam keberlangsungan hidup manusia sekaligus sebagai indikator terjaganya suatu lingkungan. Manfaat hutan dapat dirasakan manusia baik secara langsung maupun tidak langsung tetapi manfaat tersebut hanya akan dapat dirasakan apabila kualitas hutan terjaga.

Sesuai dengan namanya hutan rakyat dikelola langsung oleh masyarakat dan letaknya berada di luar kawasan hutan negara. Menurut Kementerian Kehutanan, hutan rakyat adalah hutan yang tumbuh di atas tanah yang dibebani hak milik atau hak lainnya dengan luas minimum 0,25 Ha. Kemudian dalam Keputusan Menteri Kehutanan No.49/Kpts.II/1997 dijelaskan lebih rinci bahwa 0,25 Ha penutupan tajuk hutan rakyat berupa tanaman kayu-kayuan dan atau jenis lainnya lebih dari 50% dan atau pada tanaman hutan pratama minimal memiliki 500 tanaman per hektar. Dengan demikian, hutan rakyat yang menjadi objek dalam penelitian ini merupakan hutan rakyat berada di tanah yang dibebani hak milik atau hak lainnya, bukan merupakan pekarangan karena luasnya minimum 0,25 Ha.

Karbon (C) merupakan salah satu unsur alam dengan nilai atom sebesar 12 sebagai salah satu unsur utama pembentuk bahan organik termasuk makhluk hidup yang hampir setengahnya merupakan karbon. Oleh karena itu, kandungan karbon lebih banyak di darat dan laut (tempat hidup organisme) yang sebagian besar bersumber dari hutan dibanding di atmosfer (Solichin, dkk., 2011). Karbon ini secara alamiah terbentuk melalui siklus karbon hasil interaksi biosfer dan atmosfer.

Selain fungsi ekonomis hutan rakyat bagi masyarakat desa berupa penyedia produksi kayu yang bernilai jual tinggi dan banyak diminati oleh pengusaha saat

ini, hutan rakyat memiliki fungsi ekologis yang sangat berharga salah satunya sebagai penyimpan dan penyerap karbon di atmosfer. Menurut Saputra (2013) hutan rakyat memiliki potensi yang besar untuk menyerap dan menyimpan karbon dalam bentuk tegakan dalam waktu yang lama. Secara alami siklus karbon yang terjadi di hutan alam juga terjadi di hutan rakyat yang mana tumbuhan berperan besar. Ketika tumbuhan melakukan proses fotosintesis gas karbon dioksida (CO_2) di atmosfer tidak hanya terserap dan menghasilkan gas oksigen (O_2) tetapi juga diubah menjadi karbohidrat dan ditimbun dalam seluruh tubuh tanaman yang berarti terjadi penimbunan karbon (C) yang disebut proses sekuestrasi (*C-sequestration*). Sebenarnya tumbuhan juga melepaskan CO_2 saat proses respirasi tetapi tidak signifikan karena masih dapat terserap kembali saat fotosintesis sehingga tidak memberi pengaruh yang besar terhadap penambahan karbon di atmosfer (Hairiah, dkk., 2011; Manuri, dkk., 2011). Hal tersebut menunjukkan tidak kalah pentingnya peran hutan rakyat dalam menyimpan dan menyerap cadangan karbon, sehingga dapat mengendalikan perubahan iklim.

Cadangan karbon adalah karbon yang tersimpan dalam biomassa atau ekosistem. Terdapat 3 (tiga) komponen cadangan karbon di hutan rakyat, yaitu (Tim AruPA, 2011):

1. Biomassa (tumbuhan yang masih hidup) yaitu pohon dan tumbuhan bawah (misalnya: semak, tumbuhan menjalar, rumput, gulma);
2. Nekromassa (tumbuhan yang sudah mati) yaitu pohon yang sudah mati (baik masih berdiri maupun sudah rebah) dan serasah (bagian tumbuhan yang sudah gugur dan berada di lantai hutan); dan
3. Bahan organik dalam tanah yaitu sisa-sisa makhluk hidup (tumbuhan, hewan, manusia) yang sebagian atau seluruhnya telah mengalami pelapukan menjadi tanah.

Penelitian ini menduga cadangan karbon pada hutan rakyat berdasarkan nilai biomassa di atas permukaan, pengukuran dan perhitungan cadangan karbon hanya dilakukan pada tegakan pohon yang masih hidup. Pendugaan cadangan karbon hutan rakyat termasuk sangat penting dilakukan karena Lugina, dkk (2011) menyatakan bahwa jumlah cadangan karbon tersimpan perlu diukur sebagai upaya

untuk mengetahui besarnya cadangan karbon pada saat tertentu dan perubahannya apabila terjadi kegiatan yang menambah atau mengurangi besar cadangan.

Informasi mengenai cadangan karbon dari berbagai tipe hutan, jenis pohon, jenis tanah dan topografi di Indonesia sangat penting. Dari seratus empat (104) jenis pohon di Indonesia, baru 11 jenis pohon yang sudah diketahui cadangan karbonnya. Untuk cadangan cadangan karbon di hutan rakyat dan tegakan agroforestri dapat dilihat pada Tabel 1.3 berikut.

Tabel 1.2 Cadangan Karbon pada Hutan Rakyat dan Tegakan Agroforestri

| No. | Tipe Hutan | Cadangan Karbon di Atas Permukaan Tanah (ton C/ha) | Sumber | Keterangan |
|-----|---|---|------------------|--|
| 1 | Hutan Rakyat Desa Dengok, Kecamatan Playen Kabupaten Gunung Kidul | Jati (49,00) Non Jati (17,33) Tumbuhan bawah (2,1) Serasah (0,3) Tanah (46,72) | Aminudin (2008) | Destruktif/sampling sebanyak ± 15 pohon, model alometrik Brown dan metode yang dikembangkan oleh Katterings <i>et. al.</i> (2001): Biomass = $0,11 D^{2,62}$ untuk tanaman jati, persamaan alometrik Brown (1997) untuk tanaman mahoni dan lainnya, metode destruktif untuk tumbuhan bawah dan serasah |
| 2 | Hutan Rakyat, Desa Karyasari, Kabupaten Bogor, Jawa Barat | Potensi karbon: 15,56– 194,97 ton C/ha Biomassa hidup (13,25-192,80 ton C/ha) Biomassa mati (1,45-2,90 ton C/ha) | Asyisanti (2004) | Penetapan massa karbon dilakukan berdasarkan kelas umur 0,5 tahun sampai 7,5 tahun (pohon kayu Afrika sebagai tanaman pokok) |
| 3 | Hutan Rakyat, Desa Karyasari, Kabupaten Bogor, Jawa Barat | Potensi karbon tegakan: 9,93-192,33 ton C/ha | Asyisanti (2004) | Penetapan massa karbon dilakukan berdasarkan kelas umur 0,5 tahun sampai 7,5 tahun dan dibagi antara pohon (didominasi oleh pohon afrika (<i>Maesopsis eminii</i>) dan tanaman buah-buahan: rambutan (<i>Nephelium lappaceum</i>) dan non pohon (kopi (<i>Coffea spp</i>)) |
| 4 | Tegakan Sengon di Hutan Rakyat | Kelas diameter (kg/ha): 5-10 (77,78) 10-15 (991,44) 15-20 (1.752,24) 20-25 (6.428,60) 25-30 (5.243,20) 30-40 (8.266,42) 40-50 (20.306,56) 50-up (34.378,84) | Rachman (2009) | Tegakan campuran |

Sumber: Masripatin, dkk. (Tim Perubahan Iklim Bidang Kehutanan), 2010

1.2.1.4 Pengertian Penginderaan Jauh

Lillesand dan Kiefer (1990) mengatakan, “Penginderaan jauh adalah ilmu dan seni untuk memperoleh informasi tentang objek, daerah, atau gejala dengan jalan menganalisis data yang diperoleh dengan menggunakan alat tanpa kontak langsung terhadap objek, daerah, atau gejala yang dikaji”. Dikatakan ilmu dan seni karena penginderaan jauh tidak semata-mata hanya menginterpretasi citra. Interpretasi citra membutuhkan kemampuan khusus yang tergantung dari masing-masing individu. Kemampuan ini dapat berbeda-beda, karena jam terbang dalam interpretasi citra juga berbeda-beda. Selain itu, istilah penginderaan jauh biasanya dibatasi untuk metode yang menggunakan energi elektromagnetik (seperti cahaya, panas, dan gelombang radio) sebagai alat untuk mendeteksi dan mengukur karakteristik objek (Sabins Jr., 1986).

Kusumowidagdo, dkk. (2008) menjelaskan penginderaan jauh memiliki komponen-komponen tertentu yang merupakan satu kesatuan. Komponen-komponen tersebut ada tujuh meliputi sumber tenaga, atmosfer, objek, sensor dengan wahana, pengolah data, interpretasi/analisis, dan pengguna (*user*).

Sumber tenaga dalam penginderaan jauh tersebut secara umum terbagi menjadi dua ialah yang bersifat alamiah dan bersifat nonalamiah. Selanjutnya penginderaan jauh yang menggunakan sumber tenaga alamiah disebut sistem penginderaan jauh pasif, sedangkan yang menggunakan sumber tenaga nonalamiah disebut sistem penginderaan jauh aktif.

Disebut sistem penginderaan jauh pasif karena sensor tidak mengeluarkan tenaga saat merekam, tetapi hanya memanfaatkan interaksi objek terhadap sinar matahari. Pemanfaatan perekaman objek juga melalui pancaran yang dimiliki setiap objek. “Penginderaan jauh pasif yaitu penginderaan jauh yang menggunakan radiasi yang dipantulkan secara alamiah atau diemisikan medan” (Lo, 1996). Selain itu, sumber tenaga penginderaan jauh pasif dapat bersumber dari selain sinar matahari. “Di samping sinar matahari, dapat pula digunakan sinar bulan maupun sinar buatan apabila pemotretannya dilakukan pada malam hari” (Estes dan Holz dalam Sutanto, 1987).

Disebut sistem penginderaan jauh aktif karena sensor mengeluarkan tenaga saat hendak merekam objek berupa tenaga elektromagnetik juga. Kemudian dapat disimpulkan bahwa sistem aktif ini dapat merekam pada malam hari karena tidak memerlukan sinar matahari untuk merekam objek. “Penginderaan jauh aktif memanfaatkan radiasi elektromagnetik yang dihasilkan sensor itu sendiri” (Lo, 1996). Jenis data penginderaan jauh yang menggunakan sistem ini disebut citra Radar, beberapa diantaranya menggunakan wahana satelit ialah: Radarsat, Almaz, ERS, JERS, ALOS PALSAR, SRTM, Envisat, termasuk Sentinel-1 yang merupakan data radar yang digunakan dalam penelitian ini.

1.2.1.5 Penginderaan Jauh Sistem Aktif Radar

Penginderaan jauh sistem aktif yang menggunakan gelombang mikro disebut penginderaan jauh sistem radar. Sesuai dengan namanya “Radar” merupakan singkatan dari *radio detection and ranging* yang berarti mendeteksi dan menentukan jarak objek berdasarkan gelombang radio (Sutanto, 1987). Radar merupakan sistem penginderaan jauh aktif karena memiliki sumber energi sendiri yang dibangkitkan dari sensor yang “menyinari” permukaan bumi dengan energi elektromagnetik, mendeteksi besarnya energi yang dipantulkan kembali oleh objek, dan direkam sebagai sebuah citra (Sabins Jr., 1978).

Gelombang mikro yang digunakan dalam sistem penginderaan jauh radar juga merupakan bagian dari spektrum elektromagnetik. Sama halnya dengan yang digunakan pada sistem penginderaan jauh optis merekam dengan saluran tampak, sistem termal dengan saluran infra merah.

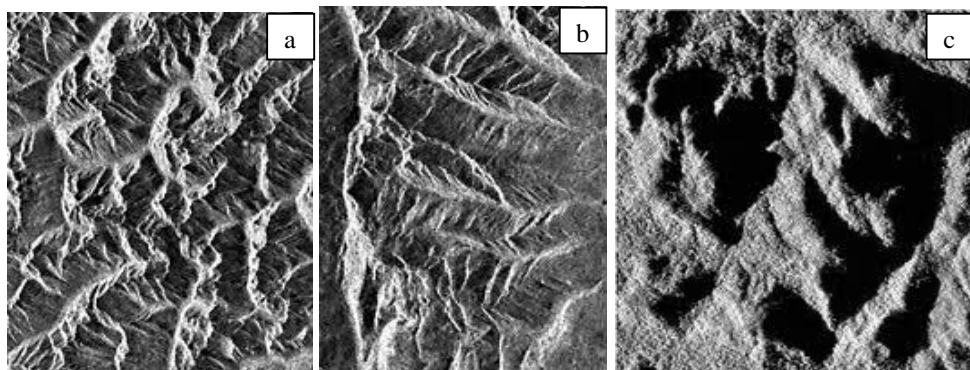
Tabel 1.3 Frekuensi Gelombang Mikro dan Salurannya

| Saluran | Frekuensi (GHz) | Panjang Gelombang (cm) |
|---------|-----------------|------------------------|
| P | 0,225 - 0,390 | 133 - 76,90 |
| L | 0,390 - 1,550 | 76,9 - 19,3 |
| S | 1,550 - 4,20 | 19,3 - 7,1 |
| C | 4,20 - 5,75 | 7,1 - 5,2 |
| X | 5,75 - 10,90 | 5,2 - 2,7 |
| K | 10,9 - 36,0 | 2,7 - 0,83 |
| Ku | 10,90 - 22,0 | |
| Ka | 22,0 - 36,0 | |
| Q | 36,0 - 46,0 | 0,83 - 0,65 |
| V | 46,0 - 56,0 | 0,65 - 0,53 |
| W | 56,0 - 100,0 | 0,53 - 0,30 |

Sumber: Meier, 1993

Sebenarnya tidak terdapat penjelasan yang tegas untuk wilayah gelombang mikro, tergantung pada domain aplikasi yang tepat, gelombang mikro berada pada frekuensi antara 0,3 dan 300 GHz (panjang gelombang 1 m hingga 1 mm) (Ulaby, dkk.,1981; Meier,1993). Tabel 1.2 menunjukkan daftar variasi frekuensi panjang gelombang pada spektrum gelombang mikro dan salurannya yang digunakan dalam penginderaan jauh radar.

Tidak seperti kebanyakan sistem penginderaan jauh lainnya, sistem penginderaan jauh radar mengindera ke arah samping (*side looking*) tegak lurus terhadap arah terbangnya wahana sambil memancarkan pulsa untuk merekam objek dan diterima kembali sebagai hamburan balik (*backscatter*). Berdasarkan waktu perjalanan pulsa radar tersebut dapat diperhitungkan jarak objek terhadap sensor sedangkan intensitas tenaga baliknya memberikan karakteristik spektral objek yang bisa disebut nilai *backscatter* (CCRS, 2014; Sutanto, 1987). Teknik perekaman menyamping ini menyebabkan geometri pencitraan penginderaan jauh sistem radar berbeda dari sistem optis.



Gambar 1.1 Distorsi Geometri pada citra SAR, efek *foreshortening* (a); *layover* (b); *Shadow* (c) (Sumber: CCRS, 2014)

Disebabkan oleh sifat geometri pencitraan SAR yang mengindera ke samping dan pengaruh variasi ketinggian objek yang terekam atau ketika merekam area medan dengan topografi yang bervariasi yang mana terdapat banyak gunung-gunung dan lembah maka terdapat 3 distorsi lokal citra SAR (lihat Gambar 1.1) terutama pada arah *range* yaitu *foreshortening* (efek pemendekan lereng depan), *layover* (efek rebah ke dalam), dan *shadow* (efek bayangan) (Meier, 1993). Efek geometri ini dapat memengaruhi turunan informasi dari data SAR sehingga perlu

untuk di koreksi geometri melalui koreksi *terrain* radiometrik, termasuk dalam penerapan di bidang kehutanan mengingat faktor topografi medan dan ketinggian pohon juga memengaruhi hasil perekaman.

Sistem radar dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu sistem *Real Aperture Radar* (RAR) dan *Synthetic Aperture Radar* (SAR). Pada sub bab selanjutnya akan lebih dijabarkan terkait SAR. Beda antara kedua sistem ini ialah antenanya yang menghasilkan resolusi spasial yang berbeda (Avery dan Berlin, 1985 dalam Sutanto, 1987).

Radar mengukur nilai rasio antar kekuatan pulsa yang ditransmisikan dan yang dipantulkan kembali oleh objek. Rasio antara hamburan dan tenaga insiden disebut sebagai hamburan balik (*backscatter*) yang mana koefisiennya dihitung dengan menormalisasi hamburan balik pada area standard. Area tersebut dinyatakan pada 3 bidang yaitu bidang *slant range* (*beta nought*), pada permukaan tanah atau *on the ground* (*sigma nought*), atau pada bidang tegak lurus arah *slant range* (*gamma nought*) (Small dan Meier, 2013). Pada penelitian ini koefisien hamburan balik yang digunakan ialah koefisien *gamma nought* dalam satuan desibel (db). Koefisien hamburan balik tersebut juga banyak digunakan pada berbagai penelitian terkait pemanfaatan data SAR untuk menurunkan informasi tutupan lahan (Sambodo dan Indriasari, 2013).

1.2.1.6 SAR (*Synthetic Aperture Radar*)

Synthetic Aperture Radar atau sering disebut SAR merupakan salah satu sistem penginderaan jauh non-optik yang bersifat aktif yang menggunakan sensor gelombang mikro aktif dengan teknik perekaman menyamping. Karena bersifat aktif maka sensor mentransmisikan sinyal gelombang mikro (radio) ke arah objek atau permukaan bumi kemudian merekam kembali seberapa besar hamburan balik dari objek. Berdasarkan waktu perjalanan pulsa radar dapat diperhitungkan jarak objek, sedangkan berdasarkan intensitas tenaga baliknya (*backscatter*) dapat ditaksir jenis objeknya (Sutanto, 1987).

Sistem *Synthetic Aperture Radar* (SAR) dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan sistem *Real Aperture Radar* (RAR), kedua sistem ini utamanya berbeda dalam metode untuk memperoleh resolusi pada arah azimuth (Sabins Jr.,

1978; Mitchell, dkk., 2012). Metode ini dibuat untuk menghasilkan data citra radar dengan resolusi tinggi terutama pada resolusi azimuth. Berbeda dengan sistem optik, resolusi spasial radar dipengaruhi oleh radiasi gelombang mikro dan efek geometri yang mana terdapat dua jenis resolusi spasial pada sistem SAR yaitu resolusi *range* dan resolusi azimuth.

Resolusi *range* tergantung pada panjang *pulse* yang dihasilkan oleh sensor radar pada wahana, sedangkan resolusi azimuth ditentukan oleh lebarnya sudut dari radiasi gelombang mikro yang menyorot ke permukaan bumi dari sensor dan jarak *slant range* (CCRS, 2014; Sutanto, 1987). Semakin panjang antenanya maka menghasilkan sorotan yang sempit dan resolusi yang lebih baik tetapi wahana tidak dapat membawa antenna yang sangata besar. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut gerak maju wahana, cara perekaman dan pengolahan gema *backscatter* (perhitungan efek doppler) secara khusus dirancang sehingga dapat digunakan untuk meniru antenna yang sangat panjang (Mitchell, dkk., 2012.; CCRS, 2014).

Metode ini yang mampu mencapai keseragaman resolusi azimuth yang baik untuk semua sapuan perekaman tersebut disebut sebagai ***Synthetic Aperture Radar*** atau **SAR**, *synthetic* yang menunjukkan antenna tiruan (sintesis) yang lebih panjang sehingga celah/lebar sorotan (*aperture*) yang terbentuk untuk merekam objek pada jarak azimuth semakin sempit.

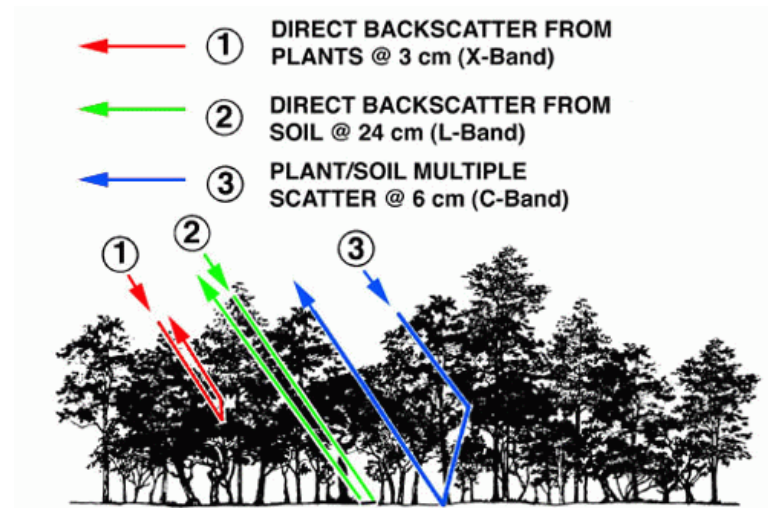
1.2.1.7 Penginderaan Jauh Radar untuk Estimasi Cadangan Karbon

1.2.1.7.1 Interaksi Sinyal SAR Terhadap Cadangan Karbon

Sinyal radar yang dipantulkan kembali oleh hutan rakyat tidak dapat secara langsung mengindikasikan nilai cadangan karbon tetapi diturunkan berdasarkan parameter biofisik vegetasi. Parameter biofisik tersebutlah yang berinteraksi secara langsung dengan sinyal SAR sehingga memiliki karakteristik hamburan balik (*backscatter*) tertentu. Hamburan balik tersebut selain dipengaruhi oleh objek yang direkam juga tergantung pada instrumen sinyal radar yang digunakan.

Penggunaan panjang gelombang radar tergantung dari aplikasinya terutama karena memiliki kemampuan penetrasi yang berbeda-beda pada objek tertentu. Citra radar saluran X, C, dan L banyak digunakan di daerah tropik yang selalu

tertutup awan dan sering menjadi data tunggal untuk beberapa daerah dengan karakteristik semacam ini (Sutanto, 1987).



Gambar 1.2 Daya Tembus Gelombang Radar Pada Vegetasi. (Sumber: Mark, 2004)

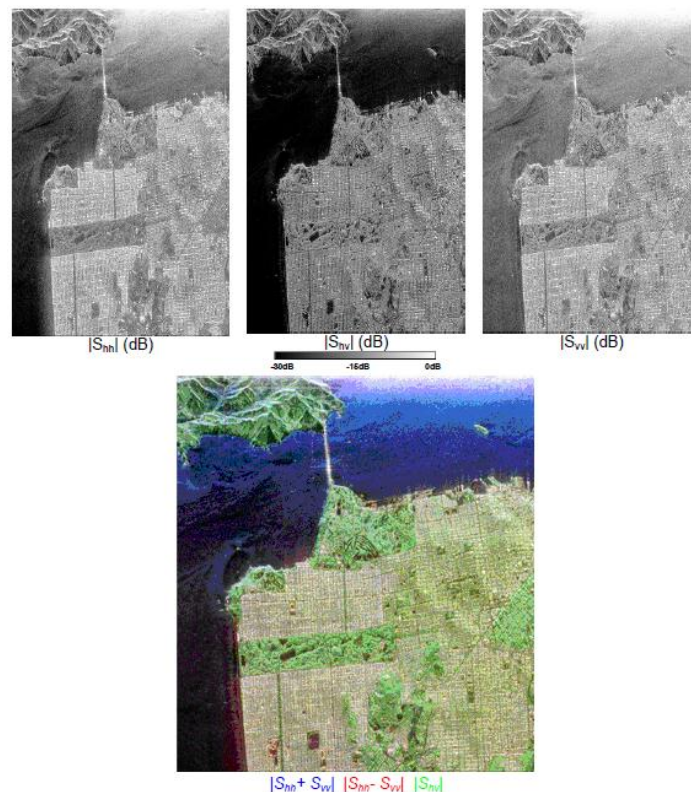
Daya tembus sinyal SAR terhadap vegetasi juga dipengaruhi oleh panjang gelombang dan struktur kanopi (ukuran dan kepadatan) (Mitchell, dkk., 2012). Short (2014) menjelaskan bahwa daya tembus meningkat sejalan dengan panjang gelombang, maka daya tembus gelombang P lebih kuat dibanding gelombang X. Di hutan misalnya panjang gelombang yang lebih pendek seperti *band C*, sebagian besar hamburan balik berasal dari atas kanopi pohon (Lihat Gambar 1.2), memungkinkan untuk memanfaatkan berbagai panjang gelombang untuk mempelajari struktur pohon dan biomassa (Mark, 2004).

Nilai hamburan balik SAR bervariasi pada range tertentu berdasarkan koefisien *sigma nought* (σ^0) yang berkisar antara +20 dB hingga -40 dB, sedangkan untuk vegetasi bervariasi antara +0 dB hingga -20 dB (Chan dan Koo, 2008). Masih berkaitan dengan nilai hamburan balik SAR juga dipengaruhi oleh kekasaran permukaan objek dan sifat dielektrik objek. Kekasaran permukaan objek bersifat relatif dipengaruhi oleh panjang gelombang dan sudut depresi antena, dikatakan kasar apabila beda tinggi rata-rata kekasarannya sama atau lebih besar dari panjang gelombang yang digunakan. Sedangkan yang dimaksud sifat dielektrik ialah

kemampuan sebuah objek untuk memantulkan atau meneruskan tenaga radar yang dinyatakan dalam konstanta dielektrik kompleks. Semakin besar nilainya maka semakin besar pula pantulannya, seperti objek air. Sehingga nilai hamburan balik semakin besar apabila objek seperti tanah dan vegetasi memiliki banyak kandungan air dan bisa dikatakan pantulan gelombang radar lebih dipengaruhi oleh kelembaban dibanding jenis objeknya (Lillesand dan Kiefer dalam Sutanto, 1987)

Penginderaan jauh sistem aktif SAR menggunakan energi gelombang mikro yang dapat ditransmisikan atau diterima dalam bidang vertikal atau horizontal disebut sebagai polarisasi (Lo, 1996; Mitchell, dkk., 2012). Menurut Siegal dan Gillespie (1980, dalam Sutanto 1987), hal tersebut dilakukan agar vektor elektrik gelombang mikro tidak mengarah secara acak. Polarisasi pada bidang vertikal atau horizontal disebut sebagai polarisasi linear, yang mana pulsa radar yang ditransmisikan dapat dipolarisasikan horizontal (H) maupun vertikal (V) begitu pula hamburan baliknya dengan cara mentransmisikan dan menerima energi bidang menggunakan antena yang berbeda. Dengan demikian dapat diperoleh empat jenis polarisasi linear yaitu HH (ditransmisikan dan diterima horizontal) dan VV (ditransmisikan dan diterima vertikal) yang disebut polarisasi balik serupa, sedangkan HV (ditransmisikan horizontal dan diterima vertikal), dan VH (ditransmisikan vertikal dan diterima horizontal) disebut polarisasi silang. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 polarisasi yang berbeda akan menghasilkan kandungan informasi yang sangat berbeda atau secara sederhana ronanya berbeda dan saling mengisi satu sama lain (Lo, 1996; Sutanto, 1987). Polarisasi yang digunakan serta metode pengolahannya akan memengaruhi hasil perekaman objek, termasuk vegetasi terkait estimasi biomassa (Sarker, Md. L.R., dkk., 2013).

Vegetasi pada citra radar cenderung berona sangat cerah akibat dari kekasaran permukaan dan sifat dielektriknya. Variasi rona yang terjadi menunjukkan adanya variasi kekasaran oleh perbedaan lebar tajuk, semakin cerah ronanya semakin kasar tajuknya. Menurut Puspitasari (2010 dalam Riska, 2011) lebar tajuk dapat dihubungkan dengan diameter atau volume pohon dimana sejalan dengan perkembangan tajuk akan diikuti membesarnya diameter batang.



Gambar 1.3 Data SAR polarimetri dan kombinasinya dalam komposit RGB
(Sumber: Martinez, C.L., dkk., 2005)

1.2.1.7.2 Data SAR Sentinel-1

Data SAR (*Synthetic Aperture Radar*) Sentinel-1 merupakan data SAR yang dihasilkan oleh perekaman satelit Sentinel-1A milik Eropa yang diluncurkan pada 3 April 2014. Satelit ini membawa sensor SAR untuk merekam permukaan bumi dengan menggunakan *C-band* beroperasi pada frekuensi 5,405 Hz yang dapat menembus awan dan hujan sehingga hasil perekamannya bebas dari gangguan cuaca dan dapat beroperasi siang dan malam sehingga baik digunakan untuk berbagai aplikasi di Indonesia yang mana data citra optik sering tertutupi oleh awan.

Beroperasi dengan dual polarisasi (HH+HV, VV+VH) sehingga baik digunakan untuk mengidentifikasi dan membedakan klasifikasi penutup lahan dan pengenalan karakteristik objek termasuk penutup lahan hutan rakyat. Dual polarisasi tersebut diperoleh melalui salah satu mode perekaman *Interferometric Wide (IW)*, dan dengan ketersediaan data level-1 GRDH (*Ground Range Detected High*) yang mampu mengkombinasikan lebar perekaman yang luas (250 km)

dengan resolusi spasial menengah (resolusi *Azimuth* x *Range*: 22 x 20 m) tetapi dapat diolah hingga menghasilkan piksel dengan ukuran 10 x 10 m, kemampuan ini menjadi kelebihan untuk menurunkan informasi terkait cadangan karbon hutan pada wilayah yang luas tetapi dengan informasi yang cukup detil. Kemampuan penetrasi *band-C* pada kanopi pohon merupakan keunggulan dari data SAR Sentinel-1 dibanding data optis sehingga parameter fisik biomassa (*dbh/diameter at breast height* dan tinggi pohon) untuk menurunkan informasi cadangan karbon dapat terdeteksi lebih baik.

Kemampuan yang tidak kalah penting ialah resolusi temporal untuk satu satelit (tanpa konstelasi bersama Sentinel-1B) ialah setiap 12 hari sekali merekam wilayah yang sama sehingga menghasilkan data *time-series* yang sangat penting salah satunya terkait bidang monitoring lahan Sentinel-1 dapat berperan dalam manajemen kelestarian hutan, klasifikasi jenis hutan, estimasi biomassa dan deteksi kerusakan hutan. Selain itu perannya untuk perubahan iklim data ini dapat digunakan untuk pemetaan bekas kebakaran hutan yang menjadi bagian penting dalam pemetaan riwayat cadangan karbon suatu hutan dan estimasi emisi karbon (SUHET, 2013). Pendugaan cadangan karbon dengan memanfaatkan data yang tersedia dengan resolusi temporal tinggi memudahkan dalam mengetahui apabila terjadi kegiatan yang menyebabkan penambahan atau pengurangan karbon berdasarkan berkurangnya lahan hutan.

1.2.2 Penelitian Sebelumnya

Penelitian mengenai pemanfaatan data penginderaan jauh aktif non optik menggunakan citra SAR untuk menduga biomassa dan cadangan karbon hutan diantaranya pernah dilakukan oleh Rosalina (2010), menggunakan citra ALOS PALSAR resolusi 12,5 m dengan polarisasi HH+HV dan VV+VH, tahun perkaman 2007 dengan mengambil lokasi penelitian di Kabupaten Kulonprogo pada hutan rakyat. Peneliti bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik citra ALOS PALSAR dalam mengestimasi biomassa dan untuk mendapatkan persamaan perhitungan biomassa untuk menaksir potensi biomassa hutan rakyat yang ada di Kabupaten Kulonprogo, menggunakan metode regresi. Pendekatan yang dilakukan

berdasarkan survei non-terestis berdasarkan hasil pengolahan ALOS PALSAR dengan menghitung biomassa menggunakan kombinasi 5 pendekatan perhitungan biomassa *aboveground* yang berbeda-beda, kemudian ekstraksi nilai pantulan palsar masing-masing polarisasi (HH, HV, dan HH+HV) menggunakan kalibrasi *sigma nought* (σ^0) berbagai polarisasi. Menerapkan 3 *adaptive* filter yaitu lee, frost dan gamma sehingga diperoleh berbagai persamaan perhitungan biomassa. Peta sebaran hutan rakyat dihasilkan menggunakan klasifikasi otomatis berbasis objek. Hasil dari penelitian ini berupa persamaan regresi terpilih yakni $Y = 0,018x + 5823$ dengan polarisasi H+HV filter lee untuk menduga kandungan biomassa di atas permukaan apada hutan rakyat Kabupaten Kulonprogo.

Rosalina (2010), menyatakan bahwa luas hutan rakyat di Kabupaten Kulonprogo berdasarkan hasil analisis cira alos palsar sebesar 36.822,4 Ha dan potensi biomasnya sebesar 3.505.237 ton dan karbon tersimpan sebesar 1.752.619 ton dengan rata-rata biomassa dan karbon sebesar 95,19 ton/ha dan 47,59 ton/ha.

Penelitian lainnya pernah dilakukan oleh Sarker, dkk. (2013) menggunakan citra RADARSAT-2 *fine-beam dual-polarization* polarisasi HV dan HH, tahun perekaman 2009 dengan mengambil lokasi penelitian pada hutan subtropis kompleks di Hong Kong. Secara umum peneliti bertujuan untuk meneliti kemampuan data RADARSAT-2 *fine-beam dual-polarization* (C-HV dan C-HH) untuk meningkatkan estimasi biomassa hutan Subtropis Kompleks menggunakan data SAR. Pendekatan yang dilakukan dengan survei lapangan untuk terlebih dahulu mengembangkan model allometrik yang cocok diterapkan untuk menentukan nilai biomassa lapangan dengan 56 titik sampel plot ukur bentuk lingkaran dengan radius 15 m. Data Radarsat dikalibrasi *sigma nought* (σ^0) dan diproses menggunakan 2 cara berbeda yakni menggunakan nilai intensitas dan pengukuran menggunakan analisis tekstur untuk pembangunan model penduga biomasa. Hubungan antara biomasa hutan dan data SAR dianalisis statistik regresi linear berganda.

Sarker, dkk. (2013), menyatakan bahwa seluruh model estimasi biomassa menggunakan data intensitas radar *C-band* polarisasi HV, HH dan rasio HV dan

HH terbukti tidak efektif, tetapi parameter tekstur yang diturunkan dari data intensitas menunjukkan potensi yang lebih baik. Hasil analisis citra berdasarkan model yang dibangun diperoleh jumlah biomassa hutan di Hong Kong mencapai 360 ton/ha dengan nilai *adjusted r*² = 0,78 dan RMSE 28,68 ton/ha menggunakan kombinasi parameter tekstur dari kedua polarisasi HV dan HH. Hasil terbaik diperoleh dengan nilai *adjusted r*² = 0,91 dan RMSE 26,95 ton/ha untuk nilai biomassa hingga 532 ton/ha menggunakan rasio dari parameter tekstur HV/HH. Hasil ini sangat memuaskan dan mengindikasikan bahwa sensor *C-band* SAR dual polarisasi brotensi untuk menduga biomassa hutan, khususnya menggunakan rasio polarisasi dari pengukuran tekstur.

Penelitian sejenis lainnya pernah pula dilakukan oleh Wijaya, dkk.(2015), menggunakan citra *quad-plarimetric* SAR ALOS PALSAR *L-Band* multi temporal (perekaman April 2007, Mei 2007, April 2009, dan April 2010) dan multi polarisasi, mengambil lokasi pada hutan rawa gambut Kampar Peninsula, Riau, Sumatra, Indonesia. Secara umum penelitian bertujuan menduga cadangan karbon hutan dan beberapa sifat biofisik tegakan dengan kombinasi data multi temporal dan multi-polarisasi L-Band data SAR alos plasar. Pendekatan yang dilakukan berdasarkan hasil analisis citra SAR dan data sampel lapangan, pra-pemrosesan data SAR dilakuka mulaidari koregistrasi, dan kalibrasi radiometrik dan normalisasi dengan nilai hamburan balik *sigma nought* (σ^0), *geocoding* citra dan filter *speckle* multi temporal menggunakan algoritma *Enhanced Lee*, selain itu menggunakan matrix kovarian, fitur SAR polarimetri dihitung sebagai polarimetri sudut alfa, *entropy*, dan *anisotropy* yang digunakan sebagai prediktor tambahan biomassa di atas permukaan untuk mempelajari efektivitasnya dalam penggunaan model. Dalam penelitian ini 83 data plot sampel digunakan yang telah dikumpulkan selama musim kering pada tahun 2009-2010.

Wijaya, dkk. (2015), menyatakan bahwa penelitiannya menguji kemampuan memprediksi dari data SAR multi temporal untuk mengestimasi biomassa di atas permukaan pada hutan rawa gambut di Asia Tenggara. Band ko-polarisasi (HH dan VV) secara umum lebih baik dibanding *cross-polarisasi* (HV dan VH) untuk memprediksi biomassa dan parameter pohon lainnya (antaratlain LAI, tinggi pohon,

diameter dan *basal area*). Penambahan fitur polarimetri SAR seperti sudut alfa, *entropy*, dan *anisotropy* telah meningkatkan kemampuan prediksi model sehingga meningkatkan akurasi estimasi biomassa dan mengurangi bias.

Penyusunan model penduga baik nilai biomassa maupun cadangan karbon penelitian-penelitian tersebut pada umumnya menggunakan metode regresi dengan model yang berbeda-beda. Sebagian besar penelitian sebelumnya menunjukkan adanya kemampuan prediksi atau estimasi yang lebih baik oleh citra SAR *L-band* ALOS PALSAR dengan memanfaatkan polarisasi dan berbagai modifikasi fitur dibandingkan dengan data SAR *C-band* tetapi juga tetap memiliki potensi apabila dilakukan modifikasi fitur.

Tabel 1.4 menyajikan ringkasan dari 3 penelitian sebelumnya dengan penelitian ini sehingga dapat terlihat persamaan dan perbedaannya masing-masing. Secara umum persamaan dari semua penelitian tersebut ialah antara lain terletak pada metode analisis untuk menurunkan informasi biomassa dan cadangan karbon dari data SAR yakni menggunakan metode analisis kuantitatif dengan cara mengkorelasikan antar nilai biomassa dan atau cadangan karbon aktual hasil pengukuran lapangan dengan nilai hamburan balik atau *backscatter* dari citra SAR sehingga dapat diduga menggunakan persamaan yang diperoleh, dan kalibrasi ke nilai *sigma nought* (σ^0), klasifikasi berbasis objek juga digunakan untuk menentukan agihan hutan rakyat. Sementara yang membedakan penelitian ini dari penelitian sebelumnya ialah citra SAR yang digunakan, tipe hutan dan lokasi penelitian/wilayah geografis, persamaan allometrik pada plot sampel yang digunakan, hanya sama pada salah satu dari 5 persamaan yang digunakan Rosalina (2010), dan kalibrasi radiometrik *sigma nought* (σ^0) menjadi *gamma nought* (γ^0).

Tabel 1.4 Ringkasan Penelitian Sebelumnya

| Nama Peneliti | Judul | Tujuan | Metode | Hasil |
|--|--|---|--|---|
| Rosalina (2010) | Penggunaan <i>Synthetic Aperture Radar</i> untuk Biomassa hutan rakyat di Kabupaten Kulonprogo | Mengidentifikasi karakteristik citra ALOS PALSAR dalam mengestimasi biomassa dan untuk mendapatkan persamaan perhitungan biomassa untuk menaksir potensi biomassa hutan rakyat yang ada di Kabupaten Kulonprogo | Survei non-terestis menggunakan data ALOS PALSAR; perolehan biomassa menggunakan kombinasi 5 pendekatan perhitungan biomassa <i>aboveground</i> , ekstraksi nilai pantulan palsar kalibrasi <i>sigma nought</i> (σ^0) berbagai polarisasi, dan penerapan <i>adaptive filter</i> ; metode regresi. | Model persamaan regresi untuk estimasi biomassa dan karbon di atas permukaan (<i>Aboveground</i>); Peta sebaran hutan rakyat KabupatenKulon Progo ; dan Jumlah biomassa dan cadangan karbon hutan rakyat Kabupaten Kulonprogo |
| Md. Latifur Rahman Sarker, Janet Nichol, Huseyin Baki Iz, Baharin Bin Ahmad, and Alias Abdul Rahman (2013) | Estsimasti Biomassa Hutan menggunakan pengukuran tekstur dari Data SAR <i>C-Band</i> Dual Polarisasi Resolusi Tinggi | Meneliti kemampuan data RADARSAT-2 <i>fine-beam dual-polarization</i> (C-HV dan C-HH) untuk meningkatkan estimasi biomassa hutan Subtropis Kompleks | Survei lapangan untuk mengembangkan model allometrik untuk menentukan nilai biomassa lapangan.; Memproses data Radarsat menggunakan 2 cara berbeda (nilai intensitas dan pengukuran tekstur); analisis regresi linear berganda. | Model penduga kandungan biomassa hutan subtropis kompleks. |
| Arief Wijaya, Veraldo Liesenberg , Ari Susanti , Oka Karyanto dan Louis V. Verchot (2015) | Pendugaan cadangan karbon biomassa pada hutan rawa gambut mengunakan data SAR multi-temporal dan multi-polarisasi. | Menduga cadangan karbon hutan dan beberapa sifat biofisik tegakan dengan kombinasi data multi temporal dan multi-polarisasi L-Band SAR ALOS PLASAR di hutan rawa gambut Kampar Peninsula, Riau, Sumatra. | Survei lapangan untuk memperoleh sifat biofisik tegakan; menggunakan persamaan allometrik untuk memperoleh cadangan karbon; ekstraksi nilai pantulan palsar kalibrasi <i>sigma nought</i> (σ^0) berbagai polarisasi;analisis korelasi dan regresi. | Jumlah Cadangan karbon dan analisis pendugaan kandungan biomassa di hutan rawa gambut Kampar Peninsula, Riau, Sumatra |

| | | | | |
|-------------------------------------|--|--|---|---|
| Athar Abdurrahman Bayanuddin (2016) | Pendugaan Cadangan Karbon di Atas Permukaan Pada Hutan Rakyat Dengan Memanfaatkan Data <i>Synthetic Aperture Radar</i> Sentinel-1 (Studi Kasus di Kabupaten Sukoharjo) | Menganalisis hubungan antara nilai hamburan balik data SAR Sentinel-1 dual polarisasi dengan nilai cadangan karbon hutan rakyat berdasarkan nilai biomassa hijau di atas permukaan; menduga cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo dengan memanfaatkan data dual polarisasi SAR Sentinel-1; dan menentukan jumlah dan agihan cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo berdasarkan data SAR Sentinel-1. | Ekstraksi nilai hamburan balik SAR Sentinel-1 kalibrasi <i>sigma nought</i> (σ^0) dan koreksi <i>gamma nought</i> (γ^0); survei lapangan untuk memperoleh nilai biomassa berdasarkan persamaan allometrik guna melengkapi data penginderaan jauh; analisis korelasi dan regresi, analisis pendekatan spasial. | Jumlah cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat Kabupaten Sukoharjo dan peta agihan cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo |
|-------------------------------------|--|--|---|---|

Sumber: Pustaka Tesis S2 Dalam Negeri dan Jurnal Penelitian Internasional

1.2.3 Kerangka Penelitian

Perubahan iklim disebabkan oleh meningkatnya emisi gas rumah kaca (GRK) terutama kandungan karbondioksida yang tinggi di atmosfer. Peningkatan emisi dapat disebabkan oleh kegiatan perindustrian berbahan bakar minyak dan pembangunan serta alih guna fungsi lahan dan hutan. Kabupaten Sukoharjo yang terletak dekat dengan Kota Surakarta mendapat pengaruh besar dalam hal kegiatan perindustrian, transportasi, pembangunan kota serta alih guna fungsi lahan hutan. Tegakan hutan rakyat yang dapat menyimpan sekaligus menyerap karbon di Kabupaten Sukoharjo berperan penting dalam menjaga kondisi lingkungan sekitarnya dan dalam konteks yang lebih luas, mempertahankannya dapat menjadi salah satu upaya mitigasi perubahan iklim yang berdampak pada pemanasan global. Mitigasi yang dimaksud ialah upaya mengurangi efek merugikan dari perubahan iklim dengan berusaha mengurangi emisi gas rumah kaca di atmosfer melalui peran pohon pada hutan rakyat yang merupakan komponen penting yang mampu menyerap dan menyimpan karbon dalam waktu yang lama melalui proses fotosintesis sehingga terjadi siklus karbon.

Dinamisnya perkembangan Kabupaten Sukoharjo utamanya perubahan lahan hutan rakyat menyebabkan perlunya perhitungan jumlah cadangan karbon tersimpan di hutan rakyat daerah tersebut, sehingga nantinya dapat diamati besarnya cadangan karbon yang tersimpan pada waktu tertentu dan perubahannya akibat adanya kegiatan yang menambah ataupun mengurangi cadangan karbon. Karbon diserap oleh tanaman yang kemudian disimpan ke seluruh tubuh tumbuhan dalam bentuk karbohidrat sebagai suatu biomassa tanaman.

Salah satu jenis biomassa pada hutan ialah biomassa di atas permukaan, sehingga karbon yang tersimpan pada jenis biomassa ini disebut sebagai karbon di atas permukaan. Untuk memperoleh nilai biomassa salah satu cara yang dapat dilakukan ialah dengan cara *non-destructive* menggunakan persamaan allometrik. Persamaan allometrik ini terdapat berbagai jenis dan pada umumnya menggunakan parameter biofisik volume batang yaitu diameter setinggi dada (dbh) dan tinggi pohon yang dapat diukur di lapangan berdasarkan sampel plot.

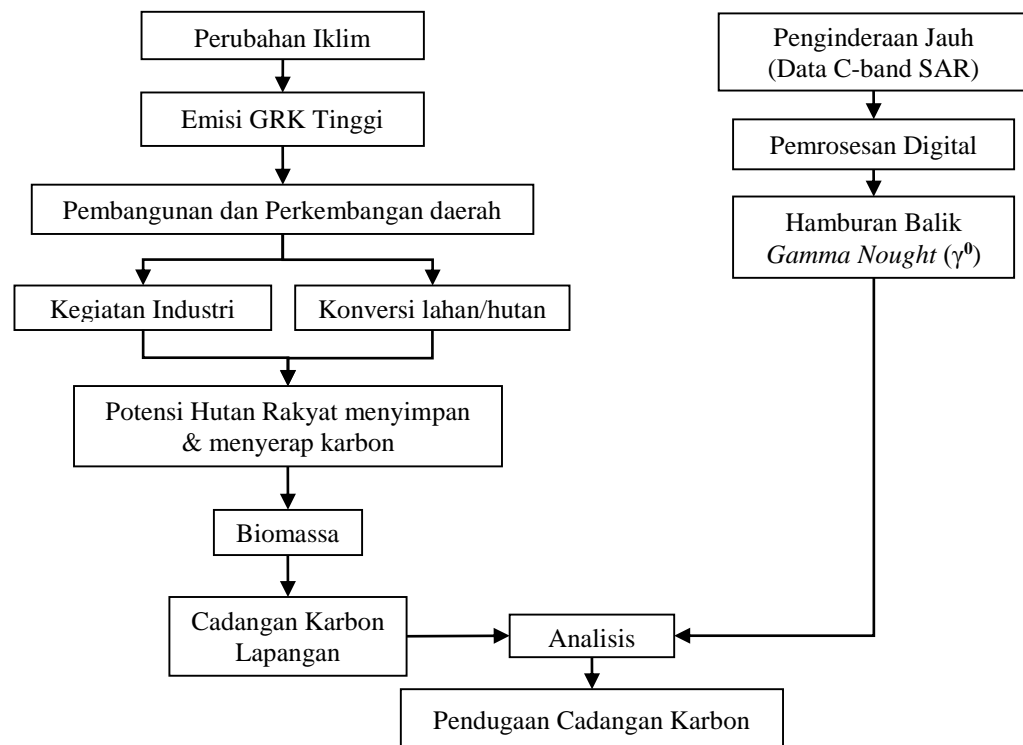
Cadangan karbon dapat diduga jumlahnya melalui parameter biofisik tersebut, teknologi penginderaan jauh salah satunya SAR (*Synthetic Aperture Radar*) semakin berkembang, salah satu yang terbaru ialah data Sentinel-1. Berdasarkan telaah pustaka dan penelitian sebelumnya data SAR dapat digunakan untuk mengestimasi kandungan biomassa suatu hutan melalui pendekatan nilai hamburan balik per piksel.

Data SAR Sentinel-1 dengan *C-band* dan dual polarisasi dengan kemampuan penetrasi pada kanopi dan tajuk pohon memungkinkan untuk dimanfaatkan dalam mengidentifikasi karaktersistik vegetasi hutan, meskipun kemampuannya tidak sebaik data SAR dengan gelombang yang lebih panjang (*band L* dan *P*). Penurunan informasi *backscatter* akan semakin baik apabila data dikoreksi dan dikalibrasi dengan baik pula, pada penelitian ini *backscatter* tidak hanya dikalibrasi sigma nought tetapi juga *gamma nought* (γ^0). Variasi nilai kecerahan data SAR menunjukkan variasi kekasaran objek vegetasi akibat perbedaan kekasaran tajuk dan sifat dielektriknya. Lebar tajuk dapat dihubungkan dengan diameter dan tinggi total pohon yang menjadi variabel dalam perhitungan kandungan biomassa berdasarkan persamaan allometrik.

Dengan demikian hamburan balik data SAR secara kuantitatif menunjukkan intensitas energi yang diterima kembali oleh antena sebagai hasil interaksi dari biofisik objek yang mana nilainya dipengaruhi oleh kemampuan penetrasi panjang gelombang, polarisasi sinyal, kekasaran dan sifat dielektrik objek. Berdasarkan hal tersebut nilai hamburan balik *C-Band* SAR dianggap dapat digunakan untuk menduga kandungan biomassa di atas permukaan pada hutan rakyat. Sedangkan kandungan cadangan karbon diperoleh dari konversi nilai biomasnya.

Hubungan antara kandungan karbon terhadap nilai piksel dianalisis secara statistik. Nilai *backscatter* sebagai variabel independen akan dapat menjelaskan kandungan cadangan karbon di atas permukaan sebagai variabel dependen. Analisis regresi yang menjelaskan variabel dependen paling baik dapat menghasilkan model yang dapat digunakan untuk mengekstrapolasi nilai lainnya, sehingga nilai *backscatter* per-piksel pada data SAR dapat diturunkan menjadi nilai cadangan karbon di atas permukaan. Jumlah dari nilai piksel turunan tersebut menunjukkan

jumlah cadangan karbon yang terdapat pada hutan rakyat di daerah kajian yang mana agihannya dapat direpresentasikan dalam bentuk peta. Uji akurasi terhadap hasil pendugaan cadangan karbon per-piksel menunjukkan seberapa baik model yang digunakan untuk menduga dan menghitung cadangan karbon. Alur kerangka penelitian dalam pendugaan cadangan karbon di atas permukaan dapat dilihat pada Gambar 1.4.



Gambar 1.4 Kerangka Penelitian

1.3 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode survei untuk melengkapi data penginderaan jauh. Survei dilakukan pada hutan rakyat berdasarkan hasil pengolahan penginderaan jauh untuk kajian per-piksel dengan nilai hamburan balik *gamma nought* data *Synthetic Aperture Radar* (SAR). Data penginderaan jauh yang digunakan merupakan data penginderaan jauh sistem aktif radar yaitu data SAR Sentinel -1 dual polarisasi (VV+VH) dengan ukuran piksel 10m. Metode pengambilan sampel untuk pengumpulan data lapangan biomassa dan cadangan karbon di atas permukaan menggunakan teknik *purposive sampling* dengan mempertimbangkan kepadatan tegakan hutan rakyat dan aksesibilitasnya.

Analisis statistik digunakan untuk memperoleh model pendugaan cadangan karbon berdasarkan data SAR dan data lapangan. Sistem informasi geografi digunakan untuk menyajikan data secara spasial sekaligus informasi jumlah dan analisis data.

1.3.1 Alat dan Bahan Penelitian

1.3.1.1 Alat

Penelitian ini menggunakan beberapa alat untuk mendukung penelitian, alat terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak yang telah dipilih sesuai kebutuhan baik yang akan digunakan di laboratorium maupun saat survei lapangan. Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Seperangkat Komputer dengan kemampuan yang kompatibel dengan perangkat lunak pengolah citra;
2. Pita ukur, digunakan untuk mengukur keliling pohon;
3. Distometer Leica D810, digunakan untuk mengukur tinggi pohon;
4. Tali plastik dan patok , digunakan untuk membuat plot sampel;
5. Tabel Pengukuran (*Tally Sheet*), papan pencatat dan alat tulis, digunakan untuk mencatat hasil pengukuran;
6. GPS (*Global Positioning System*) *Hand-held* Navigasi, digunakan untuk perolehan koordinat sampel plot;
7. Kamera digital, digunakan untuk dokumentasi kondisi sampel plot;
8. Perangkat lunak *Sentinel Application Platform* (SNAP) Desktop-*Sentinel 1-Toolbox* (S1Tbx) 3.0 untuk Windows 64-bit, digunakan untuk pengolahan data SAR Sentinel-1;
9. ENVI 5.0. untuk Windows 64-bit, digunakan untuk pengolahan data SAR Sentinel-1;
10. Perangkat lunak *ArcGIS Desktop* 10.1, digunakan untuk analisis data vektor dan penyajian data dalam bentuk peta;
11. Perangkat lunak *Microsoft Office Word* dan *Microsoft Office Excel* 2007, digunakan sebagai perangkat lunak pendukung;
12. Perangkat lunak SPSS 18, digunakan untuk analisis statistik.

1.3.1.2 Bahan

Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Data SAR *C-band* Sentinel-1 Cakupan Provinsi D.I. Yogyakarta dan sebagian Jawa Tengah No. *Orbit*:9773; No. *Track*: 76; Tipe Level 1 GRDH (*Ground Range Detected High Resolution*), *Interferometric Wide-Swath Mode* (IW), Polarisasi VV+VH, ukuran piksel 10 m, resolusi *azimuth* x *range* = 20×22 m, waktu perekaman 14 April 2016, dengan perekaman *Descending*
 - a. *item*:
S1A_IW_GRDH_1SDV_20160414T221659_20160414T221734_010823_010307_D558.SAFE
2. Data vektor (.Shp) Peta Rupa Bumi Indonesia skala 1:25.000 untuk memetakan wilayah administrasi Kabupaten Sukoharjo dan dasar koreksi geometrik data SAR.
3. DEM SRTM 3Sec v.4, untuk proses ortorektifikasi

1.3.2 Metode Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data-data ini digunakan sebagai bahan dan data pendukung penelitian. Data primer dikumpulkan melalui pengukuran di lapangan dengan inventarisasi pohon hutan rakyat wilayah kajian dalam plot sampel antarlain variabel tinggi pohon (H) dan diameter pohon setinggi dada (dbh/*diameter at breast height*) serta jenis pohon.

Data sekunder dikumpulkan melalui instansi terkait yang menyediakan data tersebut, selain itu data-data juga dapat diperoleh secara online melalui internet terutama untuk data penginderaan jauh. Berikut adalah data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini:

- 1) Data *Synthetic Aperture Radar* (SAR) Sentinel-1 (*sumber: diunduh secara gratis melalui situs resmi Sentinel-1 <https://scihub.esa.int/>*);
- 2) Data vektor (*.shp) administrasi Kabupaten Sukoharjo (Sumber: Badan Informasi Geospasial);

- 3) DEM SRTM 3Sec v.4 (*sumber: terunduh otomatis oleh software Sentinel-1 Toolbox*).

1.3.3 Metode Pengolahan Data

1.3.3.1 Pengolahan Data SAR

Subset Data

Pra-Pengolahan data SAR Sentinel-1 menggunakan perangkat lunak Sentinel-1 Toolbox (S1Tbx). Data SAR Sentinel-1 yang akan diolah hanya meliputi daerah penelitian, meliputi *band* dual polarisasi (VV dan VH) serta band sintetik yang merupakan rasio band VV dan VH (VV/VH) yang masing-masing akan diolah dan dianalisis. Oleh karena itu, terlebih dahulu dilakukan pembuatan band sintetik selanjutnya melakukan *subset* atau pemotongan citra sesuai liputan daerah penelitian. Pemotongan citra menjadi liputan yang lebih sempit akan meringankan jalannya proses pengolahan data pada komputer sehingga tidak berlangsung sangat lama.

Untuk mengolah dan mengekstraksi informasi dari data SAR, tahap pra-pengolahan data terlebih dahulu harus dilakukan untuk menghilangkan distorsi radiometrik dan geometrik citra, baik yang disebabkan geometri pencitraan SAR yang megindera ke samping maupun distorsi terhadap hamburan balik sinyal radar atau disebut sebagai kalibrasi data.

Proses Kalibrasi Radiometrik

Tahap ini sangat penting dilakukan karena data SAR akan dianalisis secara kuantitatif. Kalibrasi radiometrik mengkoreksi citra SAR sehingga nilai piksel benar-benar merepresentasikan hamburan balik radar yang dipantulkan oleh objek. Kalibrasi ini melalui menu kalibrasi radiometrik pada S1Tbx yang akan menghasilkan nilai Sigma0. Selanjutnya nilai *sigma nought* (σ^0) dikonversi ke nilai *gamma nought* (γ^0).

Proses Reduksi Speckle

Efek *speckle* atau bintik (terlihat seperti *salt and pepper*)/nilai piksel yang terlalu tinggi dan rendah pada citra SAR ditimbulkan oleh pantulan dari objek di bumi yang saling mengganggu hamburan balik sinyal radar. Filter *Speckle* dapat

diterapkan untuk mengurangi efek ini. Terdapat beberapa filter untuk data polarimetri dalam S1Tbx antara lain *Boxcar*, *Improved Lee Sigma*, *Refined Lee*, dan *Intensity Driven Adaptive Neighbourhood (IDAN)* (Veci, 2015). Pada penelitian ini digunakan salah satu filter yaitu *Refined Lee Filter*.

Proses Koreksi geometrik/koreksi *Terrain*

Langkah selanjutnya dalam proses pra-pengolahan data SAR ialah menghilangkan distorsi geometri. Distorsi tersebut disebabkan oleh geometri perekaman SAR secara menyamping (*side looking*) dan ketinggian objek serta keadaan topografi. Distorsi geometri tersebut antaralain *foreshortening*, *layover*, dan *shadow*. Proses koreksi *terrain* akan meng-*geocode* citra dengan mengkoreksi distorsi geometri tersebut menggunakan data *Digital Elevation Model (DEM)* SRTM (*Shuttle Radar Topography*) dan memproyeksikan data ke koordinat peta (Veci, 2015). Pada penelitian ini digunakan metode ortorektifikasi *Range Doppler Terrain Correction* untuk menghilangkan distorsi geometri sehingga menghasilkan data dengan ukuran piksel 10×10 m, terproyeksi peta berdasarkan datum WGS-1984 proyeksi UTM (*Universal Transverse Mercator*) zona 49S.

Setelah distorsi radiometrik dan geometrik dihilangkan, selanjutnya untuk meningkatkan akurasi geometrik citra SAR maka dilakukan rektifikasi citra berdasarkan koordinat sebenarnya mengacu pada *base map* berupa peta RBI daerah penelitian. Penentuan titik GCP (*Graund Control Point*) pada objek-objek yang tidak dinamis perubahannya seperti perempatan jalan.

Ekstraksi nilai DN (*Digital Number*)

Selanjutnya nilai *gamma nought* (γ^0) dan dikonversi ke nilai DN (*Digital Number*) menjadi satuan desibel (dB) yang merupakan koefisien hamburan balik (*Backscatter*). Pembuatan sintetik *band* dilakukan dengan tujuan agar klasifikasi berbasis objek yang dilakukan menghasilkan klasifikasi yang semakin baik.

1.3.3.2 Pembuatan Peta Hutan Rakyat/Klasifikasi Berbasis Objek

Terdapat dua jenis klasifikasi data citra satelit yaitu klasifikasi berbasis piksel dan klasifikasi berbasis objek. Pada penelitian ini klasifikasi berbasis objek digunakan untuk membuat peta penutup lahan di Kabupaten Sukoharjo yang kemudian diturunkan menjadi peta agihan hutan rakyat. Klasifikasi ini juga dikenal sebagai klasifikasi *Object Based Image Analysis* (OBIA). Berbeda dengan klasifikasi berbasis piksel, klasifikasi OBIA dalam proses klasifikasinya tidak hanya mempertimbangkan aspek spektral namun juga aspek spasial obyek. Secara umum proses klasifikasi dengan metode OBIA melalui dua tahapan utama yaitu segmentasi citra dan klasifikasi tiap segmen (Xiaoxia, dkk. 2004 dalam Indriasari, 2014). Proses klasifikasi ini dilakukan dengan memanfaatkan ketiga *band* (VV, VH, dan band sintetik VV/VH) yang dikompositkan RGB (*Red*: VV; *Green*: VH; dan *Blue*: VV/VH) menggunakan perangkat lunak ENVI.

1.3.4 Kerja Lapangan

Pra-Kerja Lapangan

Sebelum kegiatan survei lapangan berbagai alat dan bahan serta data terkait area studi dipersiapkan termasuk perancangan titik sampel plot untuk pengukuran parameter biomassa di lapangan. Teknik pengambilan sampel yang digunakan ialah *Purposive Sampling*.

Peta hutan rakyat hasil klasifikasi berbasis objek digunakan untuk menentukan titik sampel plot berdasarkan teknik pengambilan sampel secara *purposive* tersebut untuk pengukuran biomassa lapangan dengan mempertimbangkan tingkat kerapatan vegetasi hutan rakyat berdasarkan rona citra dan aksesibilitasnya agar mudah untuk di survei. Sampel yang dipilih dianggap memiliki ciri-ciri khusus yang representatif mewakili karakteristik seluruh populasi vegetasi hutan rakyat yang memiliki heterogenitas.

Jumlah sampel plot yang digunakan sebanyak 35 sampel plot. Penentuan titik-titik sampel plot tersebut untuk mewakili perbedaan kerapatan vegetasi hanya sebatas memperhatikan perbedaan dan variasi rona citranya karena untuk penentuan tingkat kerapatan berdasarkan nilai *backscatter* Sentinel-1 secara pasti masih sulit

diterapkan dalam penelitian ini. Adapun untuk lebih memudahkan pengambilan lokasi sampel dilakukan pengamatan kondisi hutan rakyat melalui *google earth*.

Data hasil survei yang dikumpulkan berdasarkan titik sampel plot akan digunakan untuk pendugaan cadangan karbon dan digunakan untuk uji akurasi hasil pendugaan persamaan regresi.

Pengambilan data lapangan

Pengambilan data lapangan sesuai dengan rencana titik sampel plot. Plot bujur sangkar, persegi, ataupun lingkaran dapat digunakan sesuai dengan kondisi lapangan. Pada penelitian ini digunakan bentuk plot lingkaran. Bentuk plot lingkaran banyak digunakan karena memiliki tingkat keterwakilan yang tinggi dibandingkan dengan plot persegi dengan luasan yang sama selain itu efektif digunakan untuk ukuran plot yang tidak terlalu luas (Manuri, 2011). Ukuran luas area plot ditentukan berdasarkan ukuran piksel yaitu 10 m x 10m.

Maka diperoleh jari-jari sampel plot lingkaran 0,5 dari ukuran piksel yaitu sepanjang 5 m. Jadi, sampel plot area dengan titik ikat sampel merupakan titik tengah lingkaran sampel plot yang diambil koordinatnya menggunakan GPS (*Global Positioning System*) dengan radius 5m.

Parameter utama yang diukur adalah keliling dan tinggi pohon serta data pendukung yang perlu dicatat ialah nama jenis pohon. Pengukuran tersebut merupakan pengukuran parameter untuk penghitungan biomassa pohon yang akan diturunkan menjadi nilai cadangan karbon di atas permukaan. Keliling pohon diukur untuk memperoleh nilai diameter pohon setinggi dada atau dbh (1,3 m). Penaksiran tinggi pohon dilakukan menggunakan distometer. Pengukuran dan penghitungan cadangan karbon hanya dilakukan pada tegakan pohon yang masih hidup. Selanjutnya hasil pengukuran dicatat pada *tally sheet*.

Pengolahan Data Lapangan

Pengolahan data lapangan dilakukan untuk menduga biomassa di atas permukaan berdasarkan hasil pengukuran pada masing-masing plot sampel yang kemudian akan diturunkan menjadi nilai cadangan karbon di atas permukaan. Perhitungan biomassa ini dilakukan dengan menggunakan persamaan allometrik

untuk perhitungan cadangan karbon pada hutan rakyat di Jawa. Adapun rumus yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1.5.

Tabel 1.5 Rumus Allometrik untuk Menaksir Biomassa Pohon Atas

| No. | Jenis Pohon | Biomassa Total |
|-----|---|-------------------------------|
| 1 | Mahoni (<i>Swietenia mahagony</i>) | $Bt = 0,9029(D^2.H)^{0,684}$ |
| 2 | Sonokeling (<i>Dalbergia latifolia</i>) | $Bt = 0,7458(D^2.H)^{0,6394}$ |
| 3 | Jati (<i>Tectona grandis</i>) | $Bt = 0,0149(D^2.H)^{1,0835}$ |
| 4 | Sengon (<i>Paraserianthes falcataria</i>) | $Bt = 0,0199(D^2.H)^{0,9296}$ |
| 5 | Akasia auri (<i>Acacia auriculiformis</i>) | $Bt = 0,0775(D^2.H)^{0,9018}$ |
| 6 | Lain-lain (<i>Others</i>) | $Bt = 0,0219(D^2.H)^{1,0102}$ |

Sumber: Tim AruPA, 2014

dalam hal ini:

Bt = biomassa total (Kg);

D = diameter setinggi dada/dbh (cm);

H = tinggi pohon (m).

Berdasarkan nilai total biomassa pohon tersebut dimasing-masing plot selanjutnya dihitung cadangan karbon di atas permukaan menggunakan persamaan (1) menurut SNI 7724:2011 sebagai berikut :

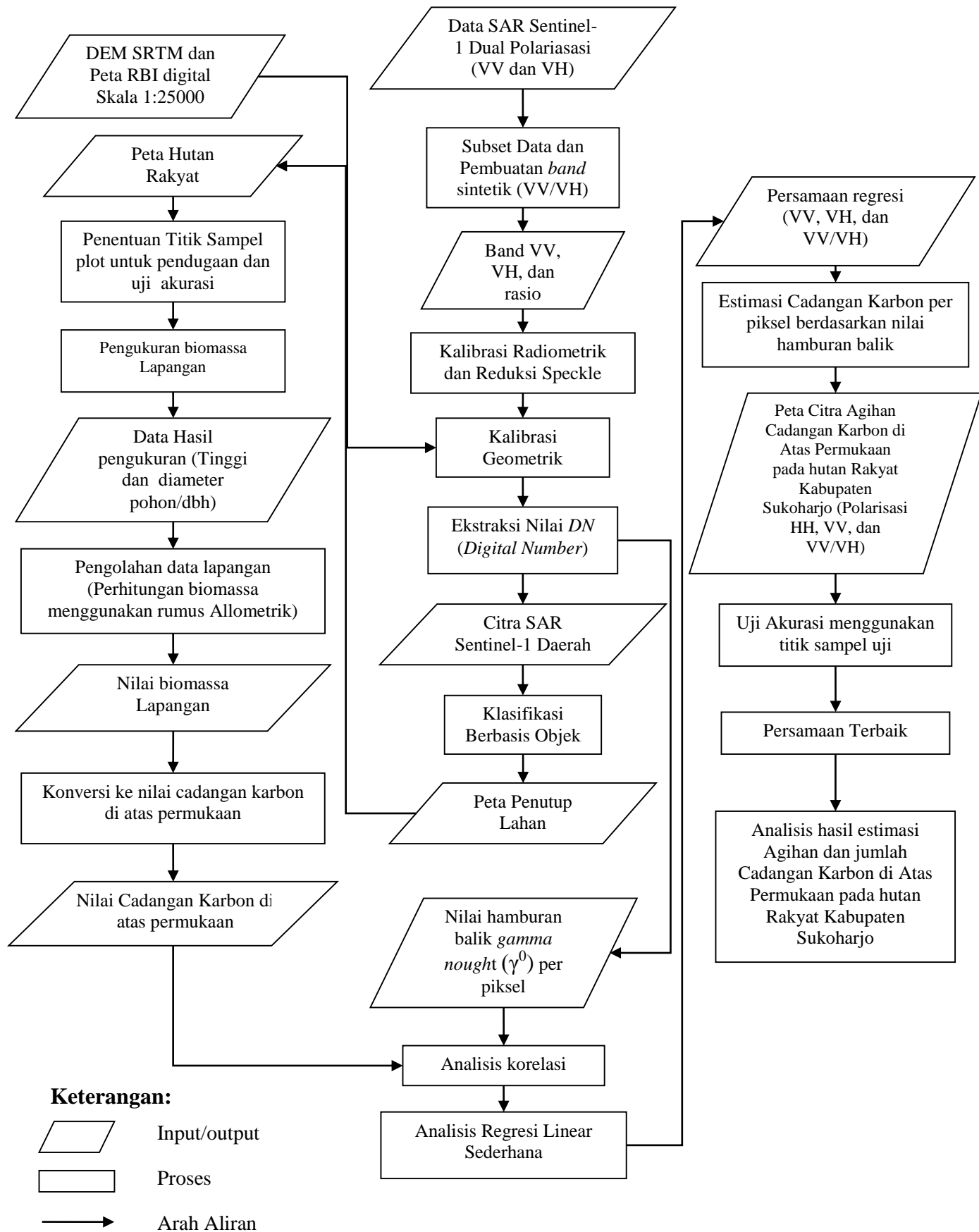
$$Cb = B \times \% C \text{ organik} \dots\dots\dots (1)$$

dalam hal ini:

Cb = kandungan karbon dari biomassa, dinyatakan dalam kilogram (kg);

B = total biomassa, dinyatakan dalam (kg);

%C organik = nilai persentase kandungan karbon, sebesar 0,47.



Gambar 1.5 Diagram Alir Penelitian

1.3.5 Metode Analisis Data

1.3.6.1 Analisis Statistik

Analisis statistik digunakan untuk menjawab tujuan penelitian pertama dan kedua. Seberapa erat hubungan antara cadangan karbon dengan nilai hamburan balik data SAR Sentinel-1 dibuktikan secara kuantitatif melalui analisis statistik. Untuk menduga cadangan karbon berdasarkan nilai hamburan balik atau nilai piksel citra SAR analisis statistik yang digunakan ialah analisis korelasi sederhana dan model analisis regresi. Seluruh titik sampel plot dianalisis untuk membangun persamaan dan untuk analisis uji akurasi.

1.3.6.1.1 Analisis Korelasi

Analisis korelasi digunakan untuk menjawab tujuan penelitian pertama. Analisis korelasi menyatakan besar kecilnya korelasi (hubungan) atau derajat keeratan hubungan dengan angka yang disebut koefisien korelasi (r) yang dapat bernilai antara -1 dan +1, yang mana -1 berarti berhubungan negatif sempurna, +1 berhubungan positif sempurna, $-1 < r < 0$ berarti hubungan moderat negatif, dan $0 < r < 1$ berarti hubungan moderat positif (Tika, 2005).

Analisis korelasi sederhana ini diterapkan pada masing-masing hubungan nilai hamburan balik data SAR Sentinel-1 baik polarisasi VV maupun VH dengan nilai cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat. Untuk memperoleh nilai korelasi sederhana digunakan metode *Product Moment Karl Pearson* sebagai berikut dalam hal ini x dan y merupakan variabel nilai hamburan balik dan nilai cadangan karbon:

$$r = \frac{N \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[N \sum x^2 - (\sum x)^2] \times [N \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \dots\dots\dots (2)$$

Parameter untuk menyatakan besar kecilnya korelasi adalah sebagai berikut (Tika, 2005):

- $r =$ 0,90 – 1,00 hubungan sangat tinggi
- 0,78 – 0,89 hubungan tinggi
- 0,64 – 0,77 hubungan sedang
- 0,46 – 0,63 hubungan rendah
- 0,00 – 0,45 hubungan sangat rendah

1.3.6.2 Analisis Regresi

Tujuan dari analisis regresi ialah untuk mengetahui pengaruh satu atau lebih variabel *independent* / bebas (x) terhadap satu variabel *dependent* / terikat (y) (Latan dan Temalagi, 2013). Sehingga harus ditentukan terlebih dahulu mana variabel bebas dan mana variabel terikat. Analisis ini digunakan untuk pendugaan variabel y dengan menggunakan variabel x.

Analisis ini digunakan untuk menduga nilai cadangan karbon berdasarkan data hasil pengukuran lapangan dan nilai piksel atau hamburan balik data SAR sehingga nilai hamburan balik data SAR merupakan variabel bebas (x) dan kandungan cadangan karbon merupakan variabel terikat (y). Analisis regresi merupakan cara yang banyak digunakan untuk menyusun persamaan pendugaan cadangan karbon. Model analisis regresi linear sederhana digunakan dalam penelitian ini dengan persamaan sebagai berikut (Tika, 2005):

$$y = a + bx \quad \dots\dots\dots (3)$$

dalam hal ini:

- y = variabel terikat yang diprediksi (cadangan karbon)
- x = variabel bebas (nilai hamburan balik)
- a = harga y bila x=0 (harga konstan)
- b = koefisien regresi

Analisis regresi linear sederhana ini diterapkan pada nilai hamburan balik data SAR sentinel-1 polarisasi VV, VH, dan band sintetik rasio VV/VH. Analisis regresi linear dari ketiga polarisasi tersebut menghasilkan koefisien determinasi (*R-Square*) yang menunjukkan seberapa besar kemampuan variabel independen dalam menerangkan variasi variabel dependen, nilai *R-Square* (r^2) 0.75, 0.50, dan 0.25 menunjukkan bahwa model yang dihasilkan kuat, sedang dan lemah (Latan dan Temalagi, 2013). Dalam menentukan persamaan terbaik dari masing-masing polarisasi mengacu pada koefisien determinasi tersebut.

Persamaan yang dihasilkan kemudian digunakan sebagai masukan persamaan untuk mengubah nilai piksel data SAR menjadi nilai kandungan cadangan karbon di atas permukaan dengan memanfaatkan perangkat lunak ENVI.

1.3.6.3 Analisis Akurasi

Analisis akurasi dilakukan untuk mengetahui keakuratan hasil pendugaan cadangan karbon di atas permukaan (persamaan) terhadap data acuan lapangan. Uji akurasi ini menggunakan hasil perhitungan cadangan karbon sebagai data lapangan. Semakin kecil nilai RMSE maka semakin tinggi akurasi hasil pemodelan. Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) adalah sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \dots\dots\dots (4)$$

Dalam hal ini X_{obs} merupakan nilai cadangan karbon hasil observasi lapangan dan X_{model} merupakan nilai cadangan karbon hasil estimasi pada data ke- i , sedangkan n merupakan jumlah data. Hasil pendugaan dengan nilai akurasi tertinggi atau nilai RMSE terendah dipilih untuk menganalisis agihan dan jumlah cadangan karbon di daerah penelitian.

1.3.6.2 Analisis Spasial dan Analisis Deskriptif Kuantitatif

Analisis spasial dan analisis deskriptif kuantitatif digunakan untuk menjawab tujuan penelitian terakhir yaitu bagaimana agihan jumlah cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo menggunakan peta tematik dan grafik. Peta tersebut dihasilkan berdasarkan hasil estimasi cadangan karbon dan direpresentasikan dengan memanfaatkan Sistem Informasi Geografis menggunakan perangkat lunak ArcGIS.

Analisis spasial yang digunakan dalam penelitian ini berupa peta agihan cadangan karbon di atas permukaan dan kelas kerapatan jumlah kandungan cadangan karbon yang menunjukkan agihan jumlah cadangan karbon di atas permukaan hasil estimasi. Melalui peta tersebut dapat dianalisis agihan jumlah cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat Kabupaten Sukoharjo dalam kelas tertentu.

Analisis deskriptif kuantitatif digunakan untuk menjelaskan jumlah cadangan karbon yang disajikan dalam bentuk grafik atau tabel. Berdasarkan grafik

atau tabel tersebut kandungan cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di setiap kecamatan dapat di perbandingkan.

1.4 Batasan Operasional

Backscatter gamma nought merupakan rasio antara hamburan dan tenaga insiden disebut sebagai hamburan balik yang mana koefisiennya dihitung pada bidang tegak lurus arah *slant range* (Small dan Meier, 2013).

Biomassa merupakan jumlah total bahan organik hidup di atas tanah pada pohon (ranting, cabang, batang utama, dan kulit) yang dinyatakan dalam berat kering ton per unit area (Brown, 1997).

Biomassa pohon bagian atas (*above ground biomass*) adalah berat total kering tanur bagian pohon di atas permukaan tanah yang meliputi batang, cabang, ranting, daun, bunga, dan buah (jika ada), dinyatakan dalam satuan kilogrm (Kg) atau ton (Peraturan Kepala badan peneitian dan pengembangan Kehutanan Nomor: P.01/VII-P3KR/201).

Cadangan karbon adalah karbon yang tersimpan dalam biomassa atau ekosistem (Peraturan Kepala badan peneitian dan pengembangan Kehutanan Nomor: P.01/VII-P3KR/201).

Cadangan karbon di atas permukaan adalah karbon yang tersimpan dalam biomassa tegakan pohon bagian atas.

Diameter setinggi dada (*dbh/diameter at breast height*) adalah diameter pohon yang diukur pada ketinggian 1.3 m di atas permukaan tanah atau sesuai kaidah pengukuran yang ditentukan (SNI 7724:2011).

Hutan rakyat adalah hutan yang tumbuh di atas tanah yang dibebani hak milik atau hak lainnya dengan luas minimum 0,25 Ha (Kemenhut, 2014)

Nilai piksel adalah nilai digital pada komputer yang menunjukkan tingkat hamburan balik yang dicatat dalam desibel (db) (Danoedoro, 2012).

Persamaan Allometrik adalah model regresi yang menyatakan hubungan antara ukuran atau pertumbuhan dari salah satu komponen individu pohn dengan

keseluruhan komponen dari individu pohon tersebut (Peraturan Kepala badan peneitian dan pengembangan Kehutanan Nomor: P.01/VII-P3KR/201).

Tegakan adalah komunitas tumbuhan (pohon) pada area tertentu (Peraturan Kepala badan peneitian dan pengembangan Kehutanan Nomor: P.01/VII-P3KR/201).

Tinggi Total Pohon yaitu tinggi dari pangkal pohon di permukaan tanah sampai puncak pohon.